



Aerodinamik Kuvvetlerin Demiryolu Araç Dinamiğine Etkilerinin İncelenmesi

Erbil BİLGİN^{*1}, Rahmi GÜÇLÜ²

¹ TÜRASAŞ Genel Müdürlüğü, Üretim, Planlama ve Kontrol Dairesi Başk., Ankara, Türkiye

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Böl., İstanbul, Türkiye

*erbil.bilgin@turasas.gov.tr

(Alınış/Received: 05.12.2023, Kabul/Accepted: 23.01.2024, Yayımlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Taşımacılık modları arasında tarihsel gelişim boyunca önemli bir yere sahip olan demiryolu taşımacılığı gelişen teknoloji ile birlikte yüksek hızlarda sağladığı güvenli ve konforlu seyahat ile yolcu taşımacılığı için tercih edilen bir ulaşım aracı haline gelmiştir. Özellikle yolcu taşımacılığında taşıma modları arasında tercih unsuru olan seyahat sürelerinin kısaltılması demiryolu araç gelişim süreçlerinde aerodinamik unsurların ön plana çıkmasına neden olmuştur. 1800 lü yıllardan itibaren başlayan demiryolu araçlarında hızlanma yarışı halen günümüzde devam etmektedir. Enerji verimliliği, sürüş güvenliği, yolcu konforu gibi birçok parametrede etken olan aerodinamik kuvvetlerin etkilerinin daha iyi anlaşılması için birçok çalışma yürütülmektedir, bu çalışma kapsamında literatürde yer alan matematiksel modellerden farklı olarak hem aracın hem de rüzgâr hızının değişken olduğu ve değişken aerodinamik verilerin gerçek zamanlı saha ölçümleri ile toplanması, kompleks bir dinamik simülasyon modeli ile simülasyonların gerçekleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Yapılan çalışmada literatüre ilave olarak demiryolu araçlarında aerodinamik etkinin araştırılmasında yeni bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Yapılan saha çalışmaları ve analizlerin sonucu olarak da belirlenen ölçüm hattı boyunca tekerlek ray kontağında meydana gelen kuvvet değişimleri irdelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu dinamiği, Aerodinamik etkiler, Tekerlek-ray kontağı

Investigation of the Effects of Aerodynamic Forces on Railway Vehicle Dynamics

Abstract: Railway transportation, which has an important place among transportation modes throughout historical development, has become a preferred means of transportation for passenger transportation with the safe and comfortable travel it provides at high speeds with the advancing technology. Especially in passenger transportation, the shortening of travel times, which is a factor of preference among transportation modes, has led to the prominence of aerodynamic factors in railway vehicle development processes. Starting in 1800s, the race for speeding up in railway vehicles still continues today. In order to better investigate the effects of aerodynamic forces, which are factors in many parameters such as energy efficiency, driving safety, passenger comfort, etc., in this study, unlike the mathematical models in the literature, a complex dynamic simulation model was created by performing simulations with a complex dynamic simulation model in which both the vehicle and wind speed are variable and variable data are obtained by collecting real-time measurement data. In this study, in addition to the literature, a new approach to investigate the aerodynamic effect in railway vehicles has been introduced. As a result of the field studies and analyzes, the lateral force changes occurring at the wheel-rail contact along the determined measurement line were examined.

Keywords: Railway dynamics, Aerodynamic effects, Wheel-rail contact

1. Giriş

Demiryolu ulaşım sisteminin tarihteki ilk örnekleri olarak kabul edilen M.Ö. 600'de Eski Yunan döneminde Mora yarımadasının etrafını dolaşmak yerine hızlı bir şekilde sevk etmek için başlayan kılavuz demiryolu sistemi yüzyıllar boyunca insanlık tarihinde devrim yaratacak gelişmeler ile birlikte en önemli taşıma aracı olarak tarihte yer almıştır. İlk kullanım alanları maden ocakları olduğu için yük taşıma kapasitesi öncelikli demiryolu araçları geliştirilmiştir,

Atıf için/Cite as: E. Bilgin, R. Güçlü "Aerodinamik kuvvetlerin demiryolu araç dinamiğine etkilerinin incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 241-257, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1400421

1800 lü yıllarda taşıma kapasite ile birlikte hızlı taşıma önceliğinin de gelmesi ile saatte 60km/sa hıza ulaşan lokomotifler tasarlanmıştır. 1900'lü yıllarda demiryolu sektörünün gelişiminin yolcu taşımacılığı üzerine olmasıyla birlikte kısa bir zaman içerisinde trenlerin sürat yarışları başlamıştır.

Demiryolu araçları hızlandıkça aerodinamik araştırmalar başta olmak üzere enerji tasarrufu ve yolcu konforu sağlamak için yeni araştırma alanları ortaya çıkmıştır. İlk etapta hem yakıt tüketimini azaltmak hem de daha yüksek hızlara ulaşılmasını sağlamak için trenlerin aerodinamik sürtünmesinin azaltılmasına önem verilmiştir. İlk lokomotifler aerodinamik açıdan değerlendirme yapılmadan ana gövde silindirik bir yapıda ön kısımları ise düz bir yüzey alanına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu temel tasarım, hızla bağlı olarak araçta yüzey basıncı oluşmasına ve aynı enerji tüketimi ile yüksek hızlara çıkılmasına engel olmaktadır.

Demiryolu aerodinamik araştırmaları ilk kez 1938'de Derby'deki Londra, Midland ve İskoç Demiryolu Araştırma Merkezi'nde Coronation sınıfı buharlı makinelerin aerodinamik sürtünmesini ölçmek ve lokomotifin etrafındaki duman dağılımını incelemek için testler yapılmasıyla başlamıştır [1]. İngiltere ve Japonya'da dar tüneller içinde hızlı hareket eden demiryolu araçlarında basınç farklılıklarından dolayı meydana gelen yolcu şikayetleri hızla bağlı aerodinamik etkilerin araştırma sürecini de hızlandırmıştır.

1938 de başlayan aerodinamik etki araştırmaları günümüze kadar artan işletme hızları ile paralel şekilde artmıştır. Günümüz uygulamalarında aerodinamik performansa yönelik analizler temel olarak aracın direnç katsayısı üzerine optimizasyon çalışmalarını içermektedir. Gerçek işletme durumlarındaki çevresel koşullara bağlı değişen aerodinamik etkilerin sürüş dinamiğine etkisi ampirik formüller ile ifade edilmektedir. Demiryolu tarihsel gelişiminde teknoloji üreten ülkelerden olan Fransa'da hızlı tren işletmecisi olan SNCF, yanal rüzgârlara karşı geliştirdiği risk analizinde hat kenarına ses duvarı olarak da kullanılan sabit rüzgâr perdeleri ve belli aralıklarla anemometre (rüzgâr hızını ölçer) koyarak rüzgâr hızının 30m/s'yi geçtiği durumlarda rüzgâr alarm sistemini devreye alarak işletme hızını kademeli olarak 320 km/sa'dan 80 km/sa'e düşürmektedir. Bir diğer demiryolu tarihsel gelişine katkı sağlayan ülke olan Almanya da Alman Demiryolları DB ise %10 tolerans dahilinde ray üzerine basan teker yükünü daimî şekilde ölçmekte ve bu noktada rüzgâr gibi çevresel etmenlerden kaynaklı yaşanan ani değişikliklerde işletme hızını düşürmektedir [2].

Aerodinamik etkenler özellikle açık alanlardaki demiryolu araç dinamiğine en çok etkileyen kuvvetlerdir. Demiryolu araçlarının dinamiğinin karakterize edildiği EN 14363 Demiryolu Uygulamaları-Demiryolu Taşıtları Seyir Niteliklerinin Kabul Deneylei-Seyir Davranışlarının Denenmesi ve Durağan Deneylei standardı [3] kapsamında tüm demiryolu araçları için yapılan güvenlik analizlerinde, aerodinamik kuvvetlerin araç dinamiğine etkisi henüz tam olarak tanımlanmamıştır. Aerodinamik kuvvetlerin araç dinamiğine etkisinin araştırılması çalışması birinci fazı Avrupa Birliği projesi kapsamında DYNOTRAIN (Railway Vehicle Dynamics and Track Interactions Total Regulatory Acceptance for the Interoperable Network) [4] projesi olarak 2009-2013 yılları arasında tamamlanmış, ikinci faz araştırmaları ise UIC projeleri kapsamında devam etmektedir. Aerodinamik etkilerin analizi demiryolu araştırma konuları arasında önemli olan yerini korumaktadır.

Bu çalışma kapsamında, öncelikle demiryolu aerodinamik analizlerinde literatürde kabul görmüş modelleme yöntemleri üzerinden inceleme gerçekleştirilecektir. Daha sonra, model olarak belirlenen Milli EMU Tren Setine ait kompleks dinamik analiz modeli oluşturulmuştur. Analiz modellemesinin yanı sıra Milli EMU Tren seti basınç analizörleri ile donatılarak livre hızlarında saha ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Aerodinamik veri ölçümü yapılan hatlar daha sonra ROGER ölçüm treni ile hat geometrisi ölçümü yapılarak, hattın modellemesi gerçekleştirilmiştir. Nihai olarak, saha ölçümlerinde elde edilen araç hız verileri, aerodinamik hız ve basınç verileri, altyapı

geometrisi ölçüm verileri simülasyonda modellenerek Milli EMU tren setinde aerodinamik kuvvet etkisinde simülasyon koşturulmuş ve tekerlek ray kontağında oluşan kuvvet ve parametre değişimleri incelenmiştir.

2. Metot

Aerodinamik kuvvetlerin demiryolu araçlarının sürüş dinamiğine etkisinin araştırılması için literatürde farklı modeller kullanılmıştır. Aerodinamik kuvvetlerin simüle edilmesine yönelik metodoloji büyük önem taşımaktadır ve aerodinamik kuvvetlerin farklı modelleri farklı doğruluk seviyeleri ile sonuçlanmaktadır.

Literatürde kabul görmüş aerodinamik matematiksel modellemede 3 farklı model yapısı bulunmaktadır;

- Sabit akışkan modeli
- Sert rüzgâr modeli
- Türbülanslı akış modeli

Son 30 yılda, gelişen mühendislik yazılımları ile demiryolu endüstrisinde demiryolu araçlarının aerodinamik etkilerden kaynaklı deray riski açısından güvenlik seviyesini araştırmak ve risk seviyesini değerlendirebilmek için yeni yaklaşımlar ortaya konulmuştur. Geliştirilmiş yaklaşımlarla yapılan çalışmalarda aerodinamik katsayılar ve araç dinamik özelliklerine etkisinin belirlenmesi olarak iki temel konu üzerinde yoğunlaşmıştır.

Mevcut araştırmalarda aerodinamik yüklerin hesaplanmasında kullanılan en yaygın yöntemler, küçültülmüş ölçekli modeller üzerinde yapılan rüzgâr tüneli testleri ve Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (CFD) analizleridir. Her iki yaklaşımın da nihai çıktısı, belirli tekerlek boşta kalma sınırı değerleri aşılmadan önce demiryolu taşıtının dayanabileceği karakteristik rüzgâr hızları kümesi olan karakteristik rüzgâr eğrileridir.

Geliştirilen matematiksel modellemelerinin yanı sıra aerodinamik etkilerin araştırılmasında rüzgâr tüneli testleri uzun yıllardır kullanılmaktadır. Belirli ölçekte hazırlanan demiryolu araçları statik olarak tünelin içerisine yerleştirilir ve rüzgâr kaynağından ayarlanabilir rüzgâr hızı ve açısı ile yanal yüzeyde oluşan kuvvetler gerinim ölçerler ile ölçülmektedir. Demiryolu aracının yüzeylerinde meydana gelen basınçlar için boru tip basınç analizörleri modelin içerisine yerleştirilmekte, farklı açı ve rüzgâr hızlarında meydana gelen basınç dağılımları ölçülmektedir. Rüzgâr tüneli testlerinde aracın statik oluşu, gerçek durumu tam yansıtmadığı için ölçekli modellere hareket mekanizması eklenmiştir. Rüzgâr tüneli içinde hareket eden model sisteminde alınan verilerde, mekanik hareket aksamı kaynaklı gürültüler meydana gelmesinden dolayı, rüzgâr tüneli testlerinin gelişimi için halen çalışmalar devam etmektedir.

Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (CFD) hem maliyet hem de süre açısından sağladığı avantajlar ile demiryolu aerodinamik analizler için tercih edilen yöntem haline gelmiştir. CFD analizlerinin dezavantajı ise statik dengedeki aerodinamik kuvvetlerin araç üzerinde etkili olduğu statik bir yaklaşımla rüzgâr verileri ve aerodinamik katsayılar rüzgâr-aracın sisteminin bir modeline girilmesidir [5].

2.1. Sabit akış modeli

Yanal rüzgâr stabilitesi üzerine yapılan araştırmaların çoğunda, yanal rüzgârın sabit akış olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, sabit akış modelindeki rüzgâr hızının doğal akışın tepe değeri olduğu kabul edilerek, aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\hat{w} = \bar{w} + k\sigma_w \quad (1)$$

\hat{w} ; Rüzgâr hızı tepe noktası

\bar{w} ; Ortalama rüzgâr hızı

σ_w ; Rüzgâr hızı standart sapması

k ; Emniyet faktörü

k 'nın farklı değerleri farklı emniyet oranlarına neden olur. Emniyet oranı, en yüksek rüzgâr hızının $\bar{w} + k\sigma_w$ değerini aşmama olasılığı olarak tanımlanır.

Rüzgâr hızının standart sapması esas olarak ortalama rüzgâr hızı ve türbülans yoğunluğuna bağlıdır. Standart sapma değeri aşağıdaki formülasyon ile hesaplanır:

$$\sigma_w = I_z \bar{w} \quad (2)$$

I_z ; Türbülans yoğunluğu

Türbülans yoğunluğu aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$I_z = \frac{1}{\ln(h/h_0)} \left(1 - \frac{5}{10^5} \left(\log \left(\frac{h_0}{0.05} \right) + 2 \right)^7 \right) \quad (3)$$

h ; yer zemininden yükseklik

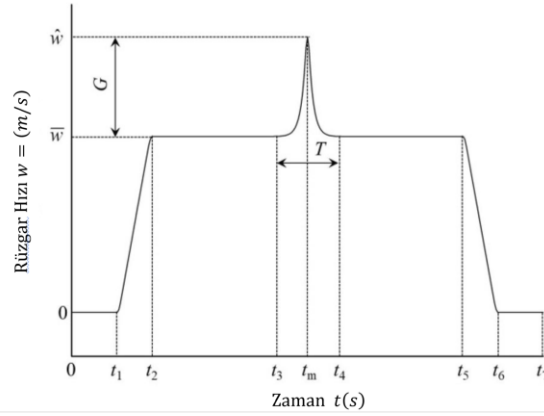
h_0 ; yüzey pürüzlülük boyu

TS EN 14067-Demiryolu uygulamaları-Aerodinamik-Yanal rüzgâr değerlendirmesi için test prosedürleri ve şartlar standardına [6] göre $h = 4$ m ve $h_0 = 0.07$ m olarak alınır.

2.2. Sert rüzgâr modeli

Sert rüzgâr senaryoları, normal türbülanslı rüzgâr sürecinin gerçekleşmesini beklemeden belirli aşırı rüzgâr koşullarını modellemek için kullanılır.

Sert rüzgâr modelinde, gerçek hayatta kararsız olan rüzgârın basitleştirilmiş bir modeli olarak zamana bağlı fonksiyonu olarak tanımlanan rüzgâr hızındaki değişimi statik aracın bulunduğu bölgeye uygulanır. Sert rüzgârın zamana bağlı değişimini simüle etmek için hazırlanan fonksiyonların farklı formları bulunmaktadır. Simülasyonlarda en yaygın olarak kullanılanlar, üstel sert rüzgâr formu, "1-cos" sert rüzgâr formu, rampa sert rüzgâr formu ve adım sert rüzgâr formudur. Üstel sert rüzgâr formu mevcut en gelişmiş matematiksel modeldir. Bunun nedeni ampirik olmaması ve gerçek rüzgâr verilerinin analiz edilmesiyle elde edilmesidir. EN 14067-6'da [6], üstel rüzgâr formun bir örneği olan Çin şapka rüzgâr formu özellikle gösterilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Çin şapka rüzgâr formu [5]

Donmuş türbülans hipotezine göre, bir sert rüzgâr daha fazla şiddetini artırmaz ve ortalama rüzgâr hızı \bar{w} ile hareket eder;

\bar{w} rüzgâr hızının sabit olduğu varsayılır. Çin şapkası sert rüzgâr modeli bir tür parçalı fonksiyon ile tanımlanabilir; burada esas odak rüzgâr hızının değişken bileşenlerini tanımlamak üzerinedir. Sert rüzgâr faktörü G ve sert rüzgâr süresi T , sert rüzgârı tanımlamak için iki ana karakteristik parametredir.

Sert rüzgâr faktörü G , maksimum rüzgâr hızı \hat{w} ile ortalama rüzgâr hızının \bar{w} oranıdır.

$$G = \hat{w}/\bar{w} \quad (4)$$

T sert rüzgâr uygulama süresi TS EN 14067-6 [6] standardına göre doğal rüzgâr hızının güç spektral yoğunluğu göre hesaplanmaktadır.

$$T = \frac{1}{2} \left(\frac{\int_{n_1}^{n_2} n^2 S_w(n) dn}{\int_{n_1}^{n_2} S_w(n) dn} \right)^{-0,5} \quad (5)$$

n frekans, n_1 frekans integral alt sınırı, n_2 frekans integral üst sınırı, $S_w(n)$ doğal rüzgâr hızının güç spektral yoğunluğu olarak tanımlanır.

2.3. Türbülans rüzgâr modeli

Türbülanslı rüzgâr modelinde, rüzgâr hızının yer değişim-zaman değişimi oluşturulur; bu durum rüzgârın fiziksel stokastik özelliklerinin yeniden üretilmesini sağlar. Rüzgârın stokastik simülasyonu tanımlanırken, ortalama rüzgâr hızına ve dalgalanan rüzgâr hızı ile tanımlanır. Belirli bir andaki rüzgâr hızı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$w = \bar{w} + w^l \quad (6)$$

w^l dalgalı rüzgâr hızı, normal dağılıma sahip stokastik bir aralıktır.

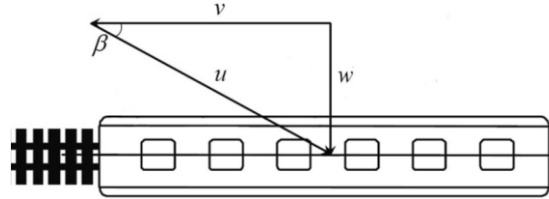
Türbülanslı rüzgâr modelinde bir dezavantaj olarak trenin düz bir hat üzerinde sabit bir v hızıyla hareket ettiği ve türbülanslı rüzgâr hızının yatay ve raylara dik olduğu kabul edilmiştir.

Türbülanslı rüzgârın aerodinamik etkilerini hesaplanması için, gerçek sürüşte olduğu gibi araca etkiyen kararsız rüzgârın modellenmesi gerekmektedir. Türbülanslı rüzgâr modeli için iki ana

yaklaşım bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan yöntem, bir hat boyunca kısa mesafelerle ayrılmış çok sayıda noktada rüzgâr hızı değişimlerini sayısal olarak simüle etmektir. Diğer yöntem ise, belirli bir andaki araç hızı ile çakışan rüzgâr hızının referans noktası alınarak rüzgâr hızının zamana bağlı değişimini araç hızını zamana bağlı değişimine oranlayarak rüzgâr hız değişimi oluşturmaktır.

2.4. Aerodinamik kuvvet hesaplaması

Demiryolu aracına etkiyen rüzgârın etkisi Şekil 2 de hız vektörel diyagramında gösterildiği üzere w rüzgâr hızı, v araç hızı ve β tren hareketine göre rüzgâr açısına bağlı olarak modellenmektedir.



Şekil 2. Hız vektörü [1]

Trene etkiyen u rüzgâr hızı,

$$u^2 = v^2 + w^2 \quad (7)$$

β tren hareketine göre rüzgâr açısı,

$$\tan \beta = \frac{w}{v} \quad (8)$$

Sabit akış modelinde rüzgâr hızının w nin sabit bir \hat{w} olduğu varsayılır, u araç hızı β tren hareketine göre rüzgâr açısının sabit olduğu kabul edilir. Sabit akış modelinde F aerodinamik kuvvet ve M aerodinamik moment, aerodinamik katsayılar kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$F = \frac{1}{2} \rho A C_F(\beta) u^2 \quad (9)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho A h C_M(\beta) u^2 \quad (10)$$

C_F aerodinamik kuvvet katsayısı, C_M aerodinamik moment katsayısı, ρ havanın yoğunluğu, A referans yüzey alanı ve h referans yüksekliği ifade etmektedir.

Çin şapkası sert rüzgâr modelinde rüzgârın kararsız yapısından dolayı β tren hareketine göre rüzgâr açısı ve u araç hızı zamana bağlı olarak değişmektedir.

Çin şapkası sert rüzgâr modelinde F aerodinamik kuvvet ve M aerodinamik moment aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho A C_F(\beta(t)) u(t)^2 \quad (11)$$

$$M(t) = \frac{1}{2} \rho A h C_M(\beta(t)) u(t)^2 \quad (12)$$

Çin şapkası modelindeki yarı kararlı varsayım araca etkiyen kuvvetlerin doğrudan rüzgârdaki değişimden dolayı kaynaklandığını kabul etmektedir. Bu kabul birçok durumda verimli olsa da türbülans rüzgâr modeli için yeterli değildir. Rüzgârın aracın tüm yüzeylerine etki etmediği kabulü ile türbülans rüzgâr modelinde aerodinamik kuvvet dalgalanmalarının rüzgâr hız dalgalanmalarını tam olarak takip etmediği için doğrulanmış alternatif bir yarı kararlı model yaklaşımı uygulanır.

Türbülans rüzgâr modeli doğrulanmış yarı kararlı model teorisine göre, F aerodinamik kuvvet ve M aerodinamik moment aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho A C_F (\beta_c(t)) u_c(t)^2 \quad (13)$$

$$M(t) = \frac{1}{2} \rho A h C_M (\beta_c(t)) u_c(t)^2 \quad (14)$$

u_c doğrulanmış hız ve bu andaki β_c doğrulanmış tren hareketine göre rüzgâr açısıdır.

$$u_c^2 = v^2 + (\bar{w} + w_c^l)^2 \quad (15)$$

$$\beta_c = \text{atan} \frac{\bar{w} + w_c^l}{v} \quad (16)$$

w_c^l doğrulanmış dalgalı rüzgâr hızı aşağıdaki formülasyon ile hesaplanır.

$$w_c^l = \sum_j [2S_{W_c}(n_j) \Delta n_j]^{0.5} \sin(2\pi n_j t + 2\pi r_j) \quad (17)$$

S_{W_c} , w_c^l hızına karşılık gelen güç spektral yoğunluğudur ve aşağıdaki formülasyon ile hesaplanır.

$$S_{W_c} = X^2 S_w \quad (18)$$

X^2 aerodinamik kabul fonksiyonudur. Bu fonksiyon için Baker [7], çeşitli trenler üzerinde yapılan tam ölçekli ve rüzgâr tüneli testlerinden elde edilen önemli miktarda deneysel veriyi bir araya getirmiş ve demiryolu trenlerinde kullanılan aerodinamik kabul fonksiyonu için basit bir ifade sağlamıştır.

$$X^2 = \frac{1}{(1 + (n_s/n^l)^2)^2} \quad (19)$$

n_s boyutsuz frekans,

$$n^l = \lambda \sin \bar{\beta} \quad (20)$$

$\bar{\beta}$ tren hareketine göre ortalama rüzgâr açısı, λ katsayısı, yanal kuvvet hesaplamaları için 2, kaldırma kuvvet hesaplamalarında 2,5 alınmaktadır.

2.5. Aerodinamik analiz modeli

Demiryolu araçlarında aerodinamik kuvvetlerin araç dinamiğine etkisinin araştırılması çalışmalarında aerodinamik etkiler sabit akışkan modeli, Sert rüzgâr modeli ve Türbülanslı Akış modeli simüle edilmiş, Hesaplamalı Akışlar Dinamiği ile statik yapılara etkisinin araştırılmış,

ölçeklendirilmiş statik modeller ile Aerodinamik Test Tüneli ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tüm bu yöntemlerin birbirlerine göre farklı kabulleri ve farklı üstünlükleri bulunmaktadır. Yöntemlere ait değişkenler Tablo 1 de belirtilmiştir.

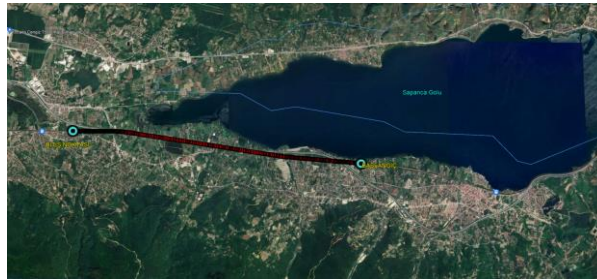
Tablo 1. Aerodinamik etki analizi modelleri

	Araç Durumu	Araç Hızı	Rüzgâr Hızı	Rüzgâr Açısı
Sabit Akışkan Modeli	Dinamik	Sabit	Sabit	Her uygulamada Sabit
Sert Rüzgâr Modeli	Dinamik	Sabit	Limitli Değişken	Her uygulamada Sabit
Türbülanslı Akış Modeli	Dinamik	Sabit	Değişken	Her uygulamada Sabit
Hesaplamalı Akış Analizleri	Statik	Sabit	Değişken	Her uygulamada Sabit
Test Tüneli Çalışmada	Statik	Sabit	Değişken	Her uygulamada Sabit
Kullanılan Dinamik Model	Dinamik	Değişken	Değişken	Değişken
Gerçek Durum	Dinamik	Değişken	Değişken	Değişken

Yapılan bu çalışmada gerçek duruma en yakın değişkenlere sahip model kurgulanmıştır, aerodinamik kuvvetler araç üzerinden tam boyutlu testler ile toplanmış, ölçüm hattına ait yol parametreleri ölçülmüş, testleri yapılan hat ve araç 725 serbestlik dereceli araç modeli ile saha ölçümlerinin simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

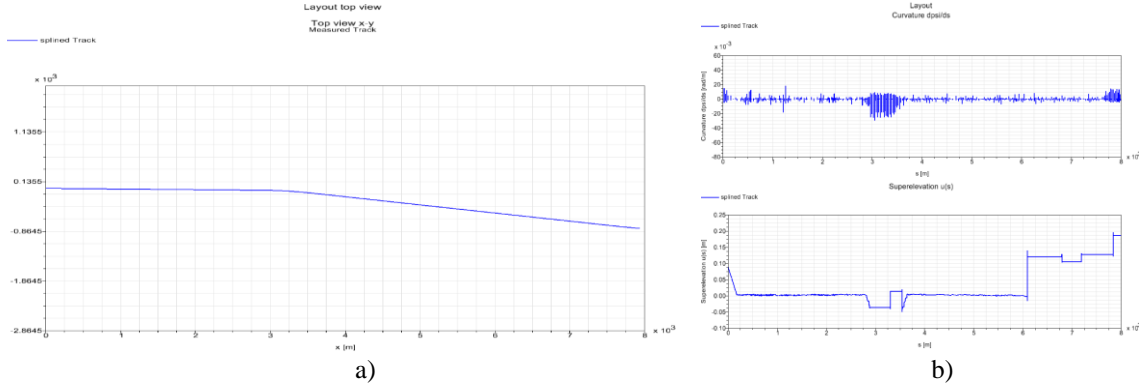
Saha ölçümleri için özellikle yanal rüzgâr durumunun incelenebilmesi için demiryolu hattının yakınında kentsel yapılanmanın bulunmaması, büyük açık alanlara ihtiyaç duyulduğundan ölçüm için Sapanca-B.Derbent hattı kullanılmıştır (Şekil 3). Sapanca Gölünün kenarında bulunan bu hatta göl üzerinden gelen hava akımları doğrudan geçiş noktasında trenlere etkimektedir. Ayrıca konvansiyonel demiryolu hattı ile havaalanı tek kesişim bölgesi olan Sapanca-B.Derbent hattı gölün yakınında bulunan Cengiz Topel Havaalanından dolayı demiryolu hattının da bulunduğu alanı da kapsayacak şekilde günlük ve mevsimlik aerodinamik veriler kayıt alınmaktadır.

Tutulan aerodinamik veri ve rüzgâr hızı istatistikleri ile risk analizi yapma imkânı bulunmaktadır.



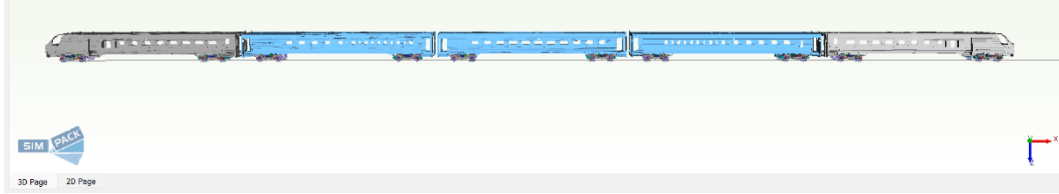
Şekil 3. Ölçüm ve analizler için belirlenen Sapanca-B.Derbent hattı

Sapanca-B.Derbent hattı demiryolu hat ölçümleri ROGER 800 ölçüm treni vasıtasıyla toplanmıştır. Toplanan hat geometrisi verileri MATLAB programı yardımı ile işlenerek SIMPACK dinamik analiz yazılımına aktarılmıştır. Hat üzerinde bulunan yol düzensizlikleri de dinamik analiz modelinde yer almıştır (Şekil 4).

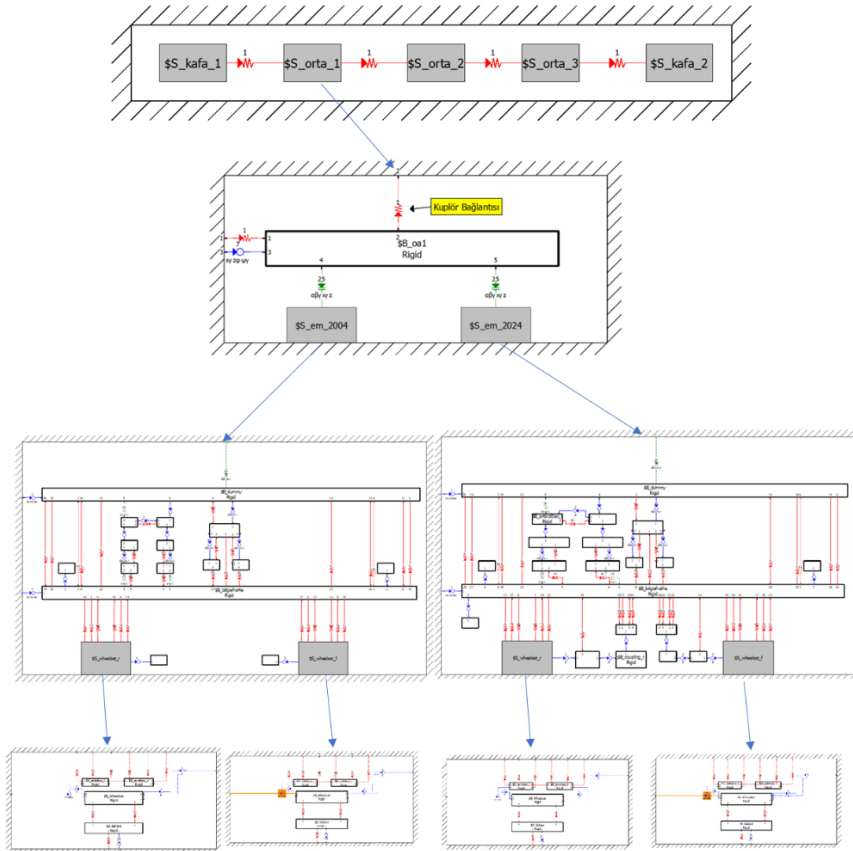


Şekil 4. Sapanca-B.Derbent hattı dinamik analiz modeli a) üstten görünüşü, b) model kurp ve dever parametreleri

Milli EMU Tren setinin modellenmesi (Şekil 5) çalışmasında, Şekil 6 da ana topolojisi görülen; 5 vagon, 10 boji, 20 adet tekerlek grubu olmak üzere modellenmiştir, 725 serbestlik derecesine sahip model oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir.

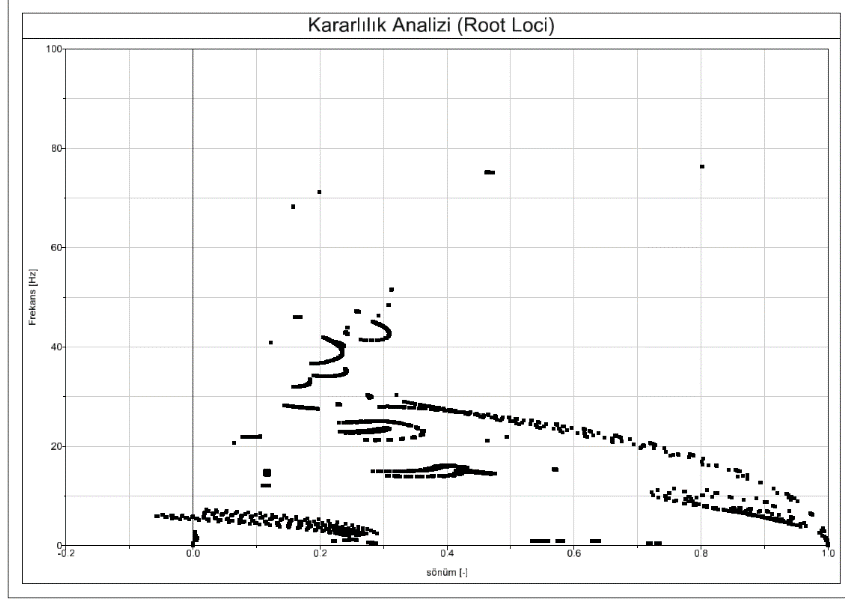


Şekil 5. Milli EMU dinamik analiz modeli görseli



Şekil 6. Milli EMU temel seviye araç topolojisi

Milli EMU dinamik analiz modelinin doğrulanması için hazırlanan kararlılık analizi modelinde 40 km/sa ile 170 km/sa hız aralığı için sistemin kararlılığı incelenmiştir. Şekil 7 de kararsız bölgeye geçen kökler incelendiğinde; hız arttıkça sistem kararsızlığa yakınsadığı, negatif sönüme geçen kısımlarda artan hız sonucu oluşan hunting salınımlarının etkisi olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7. Milli EMU modeli kararlılık analizi

Milli EMU dinamik analiz modelinin doğrulanması için ayrıca doğal frekans analizi gerçekleştirilmiş, gövde titreşim modları ve kritik frekanslarının aralıkları kontrol edilmiştir.

Araç gövdesi titreşim modları ikiye ayrılır; rijit gövde modları ve esnek gövde modları. Düşey konforu etkileyen rijit gövde modları zıplama, kafa vurma ve yuvarlanma modlarıdır. Bu modlar genellikle 0-2 Hz aralığında olan düşük frekanslı modlardır. Esnek gövde modları ise araç gövdesine etkiyen kuvvetlerden kaynaklanan deformasyonlar sonucu oluşan yanal ve yalpa modlarıdır [8].

Tablo 2. Milli EMU doğal frekans analizi sonuçları

Araç Tipi	Mod Şekli	Frekans [hz]	Sönüm [%]
Baş Araç	Gövde Yalpa	0.5	0.23
	Gövde Yanal	0.57	0.68
	Gövde Yuvarlanma	0.94	0.43
	Gövde Zıplama	0.98	0.23
	Gövde Kafa Vurma	1.21	0.2
Orta Araç	Gövde Yalpa	0.4	0.92
	Gövde Yanal	0.61	0.28
	Gövde Yuvarlanma	0.88	0.73
	Gövde Zıplama	1.13	0.26
	Gövde Kafa Vurma	1.21	0.27

Sapanca-B.Derbent hattı için önce hat modellemesi, daha sonra Milli EMU araç modellemesi gerçekleştirilmiştir. Nihai olarak da çevresel koşullar, kuvvet elemanı olarak modellenmiştir.

Aerodinamik analiz modelinde hat verisi koordinatları (Şekil 5), eş koordinattaki araç hız verisi (Şekil 10) ve rüzgâr hız verileri (Şekil 11) senkronize edilmiştir. Tüm değişken parametreler, senkron şekilde modele uygulanarak (Şekil 8), modelin tekerlek ray kontağında meydana gelen kuvvet değişimleri ve kontak alan değişimleri incelenmiştir.



Şekil 8. Milli EMU dinamik analiz modeli aerodinamik verilerin uygulanması

2.6. Aerodinamik verilerin toplanması

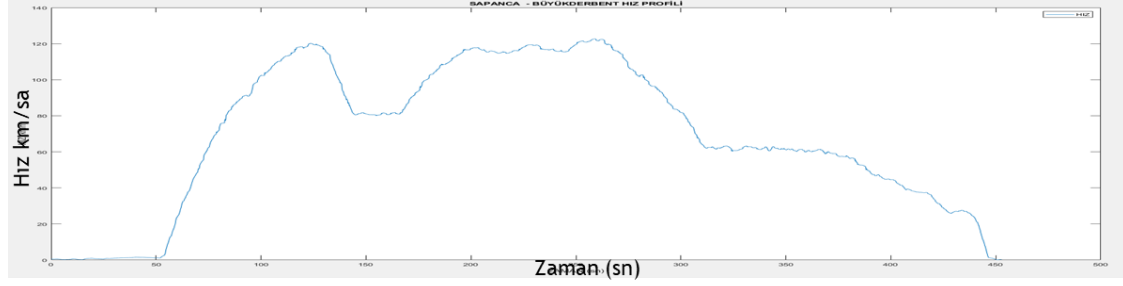
Literatür çalışmalarında, rüzgârın kararsız davranışlarının matematiksel modellenmesi için sabit akışkan modeli, sert rüzgâr modeli ve türbülanslı akış modeli kullanılsa da hem araç hızının sabit olmaması hem de rüzgâr hız ve açısının kararsız oluşu simülasyonlarda bahsedilen matematiksel modelin gerçek durumu tam karşılamadığı bilinmektedir. Bu yaklaşımı geliştirmek için CFD analizlerine göre tren yüzeyi Ön kabin yan yüzey, birinci boji üstü, orta bölüm ve arka boji üzeri olmak üzere 4 alana bölünmüştür. Kritik olan her bir bölüme 1,5 m ve 2.5 m ye basınç sensörleri yerleştirilmiştir. Özellikle, havacılık uygulamalarında kanatların üzerinden geçen akışın basıncını ölçmek için geliştirilmiş EPL yüzey basınç sensörleri kullanılmıştır. Bu sensörlerin avantaj sağlayan en temel özelliği değişken rüzgâr açısı, rüzgâr hızı ve araç hızı da olsa yüzeye gelen basınçlardan kuvvet normallerini verebilmesidir. Sensör yüzeylerinden alınan kuvvet verileri tüm yüzey alanına uygulanarak, tüm araca etkiyen kuvvet normalleri hesaplanmıştır.

Modellenen EMU tren setinde kullanılacak aerodinamik veriler, 200 Hz örnekleme frekansında EPL yüzey basınç sensörleri ile modellenen Sapanca-B.Derbent hattında 64 kanallı IMC Cronoflex veri toplayıcısı ile toplanmıştır (Şekil 9).

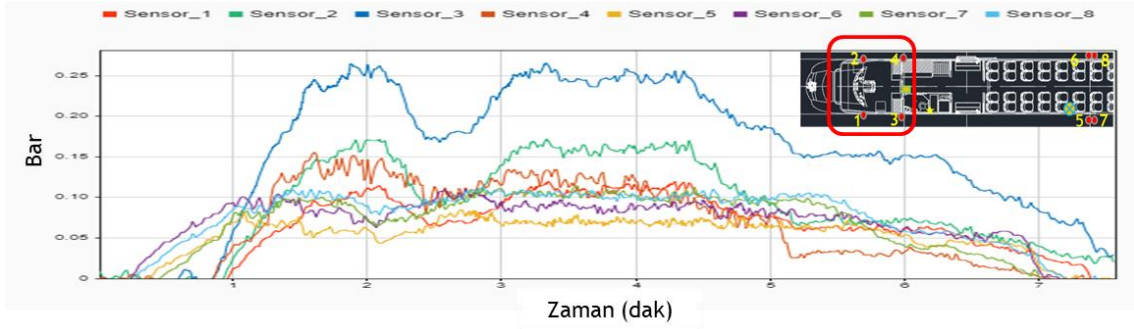


Şekil 9. Milli EMU yol testleri aerodinamik veri toplanması

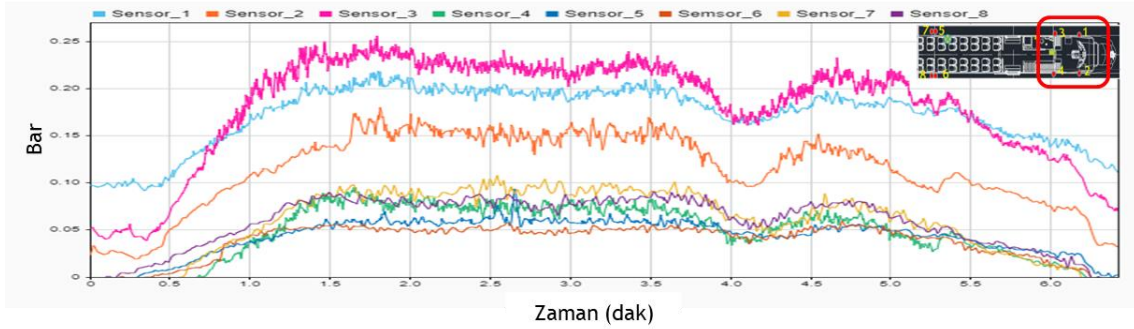
Simülasyon çalışmasında test yapılan hattın üzerinde aynı hız verisiyle eşlenmiş aerodinamik verinin koşturulması için saha ölçümlerinde Garmin GPS aracı ile 5 Hz de hız verisi toplanmıştır (Şekil 10). Daha sonra, 5Hz örnekleme verisi Matlab yardımı ile 200 Hz e genişletilmiştir. Saha testleri normal işletme koşulları ve 120 km/sa livre hızında gerçekleştirilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Sapanca-B.Derbent Ölçümü livre hız profili



a)



b)

Şekil 11. Sapanca-B.Derbent ölçümü a) baş araç yüzey basınç verileri, b) son araç yüzey basınç verileri

3. Bulgular

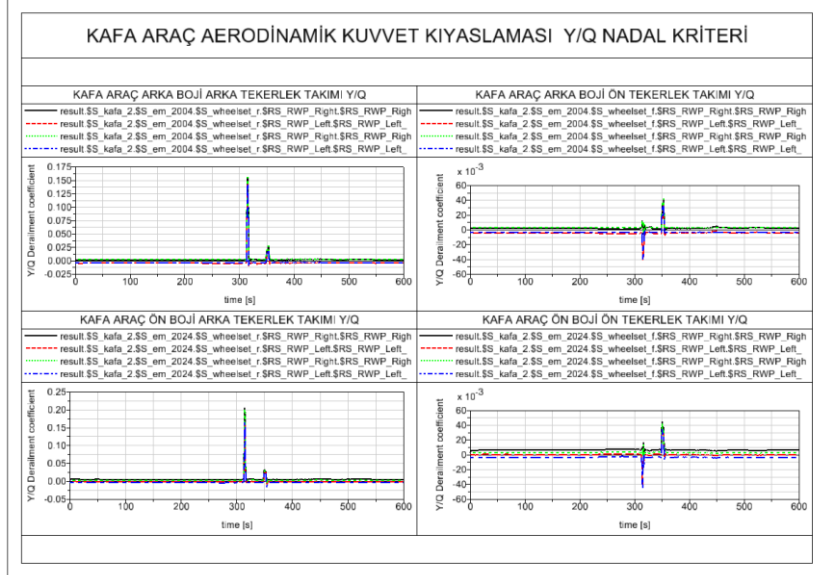
Testler ve simülasyonlarda livre hızı olarak belirlenmiş maksimum 120 km/sa araç hızında, mevsim normali olarak kabul edilen ve ölçüm gününde kayıt altına alınan 5.4 km/sa ortalama rüzgâr hızında toplanan aerodinamik kuvvetler simülasyona uygulandığında Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14' te görüleceği üzere seti oluşturan tüm vagonlarda aerodinamik kuvvetlerin yanıl stabiliteye etkisi nedeniyle Y/Q deray karakteristiğinde değişikliklerin olduğu gözlemlenmiştir.

Baş araçta aerodinamik etkilerden dolayı Nadal kriterinde oluşan fark 002 iken, orta3 araçta fark 0.017, orta2 araçta fark 0.020, orta1 araçta fark 0.019 ve son araçta fark 0.450 olduğu tespit edilmiştir.

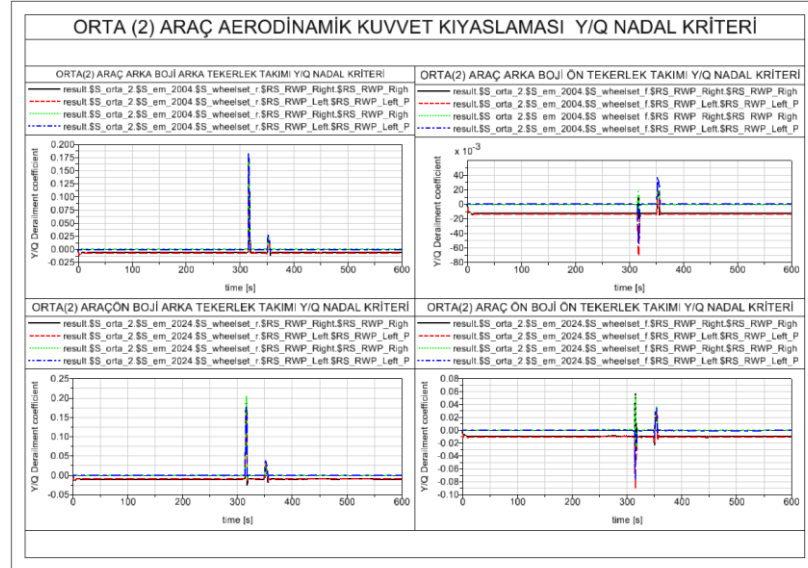
Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14' te kırmızı ve siyah eğriler; aerodinamik kuvvetlerin uygulandığı analizdeki boji/tekerlek takımında; siyah olan eğriler sağ tekerlek kontağını, kırmızı olan eğriler sol tekerlek kontağını temsil etmektedir,

Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14’ te mavi ve yeşil eğriler; aerodinamik kuvvetlerin uygulanmadığı durumdaki boji/tekerlek takımında; yeşil olan eğriler sağ tekerlek kontağını, mavi olan eğriler sol tekerlek kontağını temsil etmektedir.

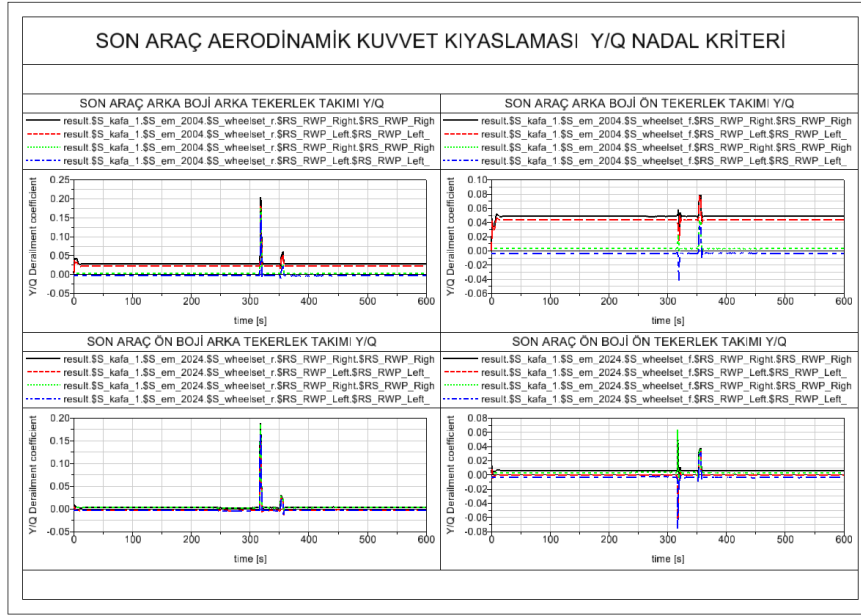
Eğrilerde temel olarak orta araçlar benzer özellik sergilediği için orta araçlar yaklaşık temsil eden orta2 aracının eğrileri verilmiştir.



Şekil 12. Baş araç Y/Q deray analizi



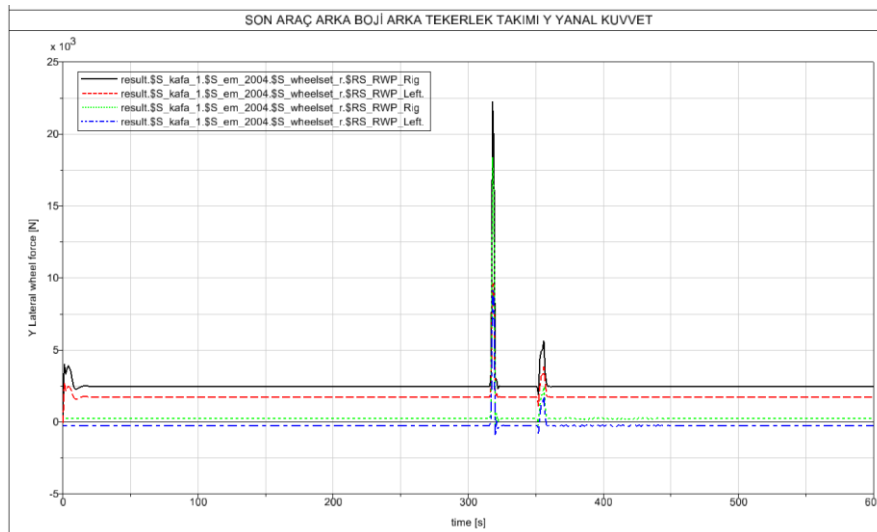
Şekil 13. Orta araçlar Y/Q deray analizi



Şekil 14. Son araç Y/Q deray analizi

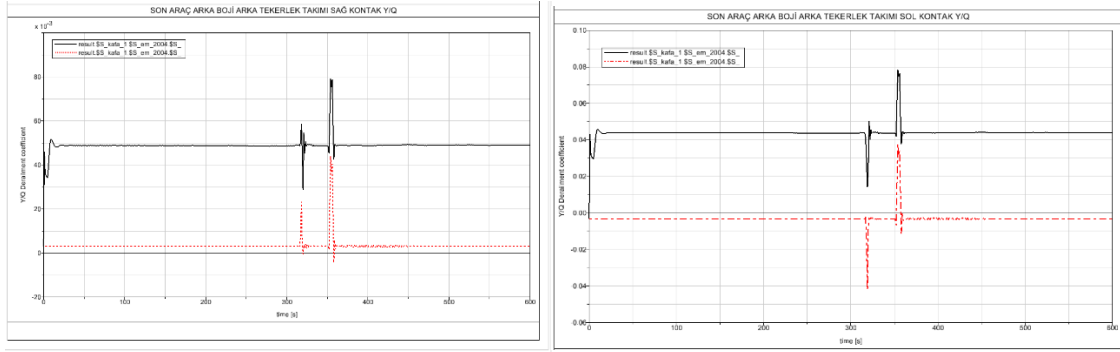
Sapanca-B.Derbent hattında livre hızı ile yapılan analizlerde öncelikle aerodinamik kuvvet büyüklüğü açısından en yüksek kuvvetlere baş araç maruz kalsa da yanıl salınım açısından en kritik vagonun son vagon olduğu tespit edilmiştir. Tüm tren setinin Y/Q deray analizlerinde en yüksek değer son araç arka bojide olduğu tespit edilmiştir. Tren setinin seyri esnasında en yüksek deray katsayısına sahip olan son araç arka bojide bulunan iki tekerlek takımı da incelendiğinde arka tekerlek takımının Y/Q deray değeri daha büyük olduğu için kontak analizleri için kritik tekerlek takımı olarak belirlenmiştir.

Kritik tekerlek takımının Y yanıl kuvvetlerin değışimi incelendiğinde (Şekil 15); aerodinamik etki altındaki sağ tekerlek kontağı (siyah eğri), aerodinamik kuvvetlerin etkilediğı sağ tekerlek kontağına (yeşil eğri) göre maksimum 3785 N luk bir yanıl kuvvet meydana geldiğı tespit edilmiştir. Sol tekerlek kontaklarında ise kırmızı eğri ile belirtilen aerodinamik etki altındaki sol tekerlek kontağı ile mavi eğri ile belirtilen aerodinamik kuvvetlerin etkilediğı sol tekerlek kontağına göre maksimum 3036 N luk bir yanıl kuvvet meydana geldiğı tespit edilmiştir.



Şekil 15. Kritik tekerlek takımı Y yanıl kuvvet değışimi

Aerodinamik kuvvetlerin modele eklenmesi ile meydana gelen ilave yanal kuvvet, Şekil 16a ve 16b’ de görüleceği üzere Y/Q olarak tanımlanan Nadal derayman değerinde de değişikliklere neden olmuştur. Kritik tekerlek takımı ray kontakları Nadal kriteri açısından değerlendirildiğinde aerodinamik kuvvetler yok iken sağ tekerlek kontağında Y/Q Nadal derayman değeri maksimum 0.0438, aerodinamik kuvvetler uygulanınca ise Y/Q Nadal derayman değeri %!80 değişerek 0.0794 ‘e yükselmiştir. Sol tekerlek kontağı için aerodinamik etkenler yok iken Y/Q Nadal derayman değeri maksimum 0.0375, aerodinamik kuvvetler uygulanınca Y/Q Nadal derayman değeri %209 artarak 0.0785 ‘e yükselmiştir.

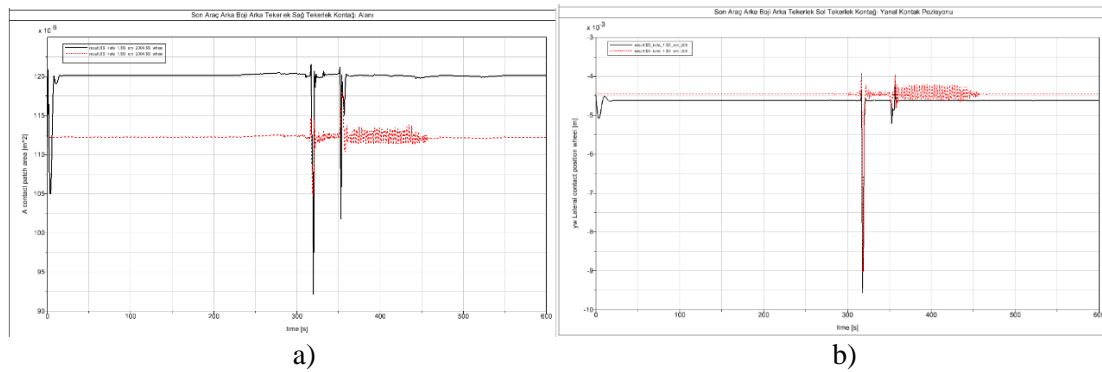


Şekil 16. Kritik tekerlek takımı a) sağ tekerlek kontağı Y/Q derayman katsayısı, b) sol tekerlek kontağı Y/Q derayman katsayısı

Aerodinamik kuvvetlerin modele uygulanması ile tekerlek-ray kontağındaki kuvvet değişimlerinden etkilenme durumunun incelenmesi gereken bir kontak parametresi de kontak alanıdır.

Kritik tekerlek takımı için kontak alan değişimleri incelendiğinde (Şekil 17a ve 17b); sağ tekerlek kontak alanı (Şekil 17a) (kırmızı eğri) aerodinamik kuvvet etkileri yok iken 113.8 mm², aerodinamik kuvvet uygulandıktan sonra (Şekil 17a) (siyah eğri) 121.6 mm² olmaktadır.

Sol tekerlek kontak alanları incelendiğinde (Şekil 17b) (kırmızı eğri) aerodinamik kuvvet etkileri yok iken 114 mm², aerodinamik kuvvet uygulandıktan sonra (Şekil 17b) (siyah eğri) 110 mm² olmaktadır.



Şekil 17. Kritik tekerlek takımı a) sağ tekerlek kontak alan değişimi, b) sol tekerlek kontak alan değişimi

4. Sonuç

Artan mobilite ihtiyacı ve çevre dostu ulaşım arayışı yolcu taşımacılığının demiryolu sektörü ile gerçekleştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Seyahat sürelerinin güvenli bir şekilde kısaltılması ve

demiryolu araçlarının işletme hızlarının artması, araç tasarımlarında aerodinamik davranışların iyileştirilmesi ile mümkün olabilecektir.

Aerodinamik kuvvetlerin sürüş dinamiğine etkisinin araştırılması için bu çalışmada, literatürde bulunan metotların dışında, özgün olarak gerçek işletme şartlarına yakın bir dinamik model oluşturulmuştur. Bu model üzerinden, güvenlik açısından en kritik olan tekerlek takımı belirlenmiş ve bu tekerlek takımı ray kontaklarında aerodinamik kuvvetlerden dolayı oluşan yanal kuvvet değerleri analiz edilmiş ve oluşan aerodinamik yanal kuvvet kaynaklı kontak alan değişimleri hesaplanmıştır.

Aerodinamik kuvvetlerin sürüş dinamiğine etkisi için hazırlanan bu dinamik model yaklaşımı ile Milli EMU tren seti için ölçülen güzergâhta, livre hızlarında ve mevsim normallerinde olan bir rüzgâr etkisinde Y/Q deray katsayısı incelenmiş ve deray sınır olan 1.2 katsayısına ulaşmadan hat boyunun güvenli bir şekilde işletilebileceği belirlenmiştir. Ancak, ölçüm yapılan hattın bu çalışma esnasındaki rüzgâr hızının 5,4 km/sa olduğu ve 2023 yılı ölçülmüş maksimum rüzgâr hızının ise 62 km/sa olduğu, mevsimsel olarak birçok noktada rüzgârın 50 km/sa hıza ulaştığı göz önüne alınır, aerodinamik etkileri gerçek kararsız duruma yakınsayan bu dinamik analiz yaklaşımı ile demiryolu hatlarının risk haritasının oluşturulması, riskli belirlenen alanlar için bu dinamik model yaklaşımı ile araç bazlı simülasyonlar yapılması ve işletme hız azaltımının, bu risk analizi verilerine göre yapılması gerekmektedir.

Teşekkür

Desteklerinden dolayı, TCDD DATEM İşletme Müdürlüğüne, TCDD Yol Bakım Dairesi Başkanlığına, TCDD Taşımacılık A.Ş. Araç Bakım Dairesi Başkanlığına ve TÜRASAŞ Genel Müdürlüğüne teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] C. Baker, 'A review of train aerodynamics Part 1 – Fundamentals', *The Aeronautical Journal*, cilt. 118, sayı. 1201, 2014.
- [2] Işık B. ve ark., “Yüksek hızlı trenlerde aerodinamik tasarımın önemi ve uluslararası standartlarda yapılan yenilikler,” *Demiryolu Mühendisliği*, sayı:10, ss. 75-83, 2019.
- [3] *Demiryolu uygulamaları, Demiryolu taşıtları seyir niteliklerinin kabul deneyleri - Seyir davranışlarının denenmesi ve durağan deneyler standardı*, TS EN 14363+A2, 2022.
- [4] Shift2Rail, "Final Report Summary - DYNOTRAIN (Railway Vehicle Dynamics and Track Interactions Total Regulatory Acceptance for the Interoperable Network)" 2013. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://cordis.europa.eu/project/id/234079/reporting>. [Erişim Tarihi: 17 Nisan 2023].
- [5] S. Giappino ve ark., “Cross wind and rollover risk on lightweight railway vehicles,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, cilt. 153, ss. 106–112, 2016.
- [6] *Demiryolu uygulamaları - Aerodinamik - Bölüm 6: Yanal rüzgârlara maruziyet değerlendirilmesi ile ilgili gerekler ve deney yöntemleri*, TS EN 14067-6, 2022.
- [7] C.J. Baker, “The simulation of unsteady aerodynamic crosswind forces on trains,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, cilt. 98, ss. 88–99, 2010.
- [8] M. Metin, “Raylı sistem araçlarının modellenmesi ve titreşimlerinin kontrolü,” Yüksek lisans tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.

Özgeçmiş**Erbil BİLGİN**

Lisans Eğitimini Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde, Yüksek Lisans Eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır, Doktora eğitimine Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde devam etmektedir. TÜVASAŞ Ar-Ge Dairesi ve Boji fabrikası müdürlüklerinde görev yaptıktan sonra, TCDD DATEM İşl. Müdürlüğünde Demiryolu Araçları Müdürlüğünde Ar-Ge mühendisliği ve DATEM Müdür yardımcısı olarak görev yapmıştır. TÜRASAŞ'ın kurulmasıyla birlikte Üretim, Planlama ve Kontrol Daire Başkanı olarak görev almış ve bu görevine devam etmektedir.

E-posta: erbil.bilgin@turasas.gov.tr

**Rahmi GÜÇLÜ**

Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde, 1985 yılında Lisans Eğitimini, 1988 yılında Yüksek Lisans Eğitimini, 1996 yılında ise Doktora Eğitimini tamamlamıştır. YTÜ Makine Mühendisliği Bölümü Makine Teorisi, Sistem Dinamiği ve Kontrol Anabilim Dalı Başkanı olarak görev yapmaktadır. Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ'nün, ilgi alanları arasında Makine Teorisi ve Dinamiği, Sistem Dinamiği Kontrolü, Taşıt Sistemleri Dinamiği, Mekanik Titreşimler ve Endüstriyel Gürültü konuları bulunmaktadır.

E-posta: guclu@yildiz.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede, bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Erbil BİLGİN: Analiz ve veri işleme çalışmaları, Rahmi GÜÇLÜ: Saha ölçüm planlaması ve proje yönetimi.